

В.И. МИЛЫХ, д-р техн. наук, **Н.В. ПОЛЯКОВА**,
И.В. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук (г. Харьков)

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ РЕАКТИВНОГО МОМЕНТА В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ С НЕЯВНОПОЛЮСНЫМ РОТОРОМ

Наведено результати чисельно-польових розрахунків реактивного моменту турбогенератора з неявнополюсним ротором у разі дії обертового магнітного поля обмотки статора. Подано кутові моментні характеристики як з врахуванням насичення магнітопроводу, так й без урахування.

The results of numerical-field computation of a nonsalient pole turbogenerator reactive torque in the issue of stator winding rotating field have been presented. In the article the torque-angle curves with and without saturation of a magnetic circuit have been viewed.

В классической теории электрических машин [1] силовые взаимодействия ротора и статора определяются аналитически на основе упрощенных математических моделей. Так, для электромагнитного момента есть достаточно простые выражения, но точность числовых значений зависит от точности расчета входящих в них магнитных величин либо производных от этих величин, таких как магнитные потоки и потокоцепления, индуктивности и соответствующие сопротивления. Принятые упрощенные математические модели, построенные на основе теории магнитных цепей, дают удовлетворительные результаты в случае наличия неявнополюсного сердечника якоря (на статоре или роторе) с распределенной обмоткой, когда рассматривается взаимодействие магнитного поля с токонесущими структурами достаточно простой формы. Получение приемлемых по точности результатов существенно усложняется при определении реактивных взаимодействий, например, при наличии неоднородных по дуге окружности сердечников (в том числе при явно выраженных полюсах) и при отсутствии обмотки. В таких случаях речь идет об реактивных моментах вращения.

При расчетах реактивных моментов наиболее эффективным является прямой подход – непосредственно через решение магнитной полевой задачи, что возможно при использовании численных методов - методов конечных разностей [2] и конечных элементов [3]. Переходы от распределений магнитных полей к силовым взаимодействиям даны в [4] и наиболее предпочтительным из них является метода натяжения силовых линий магнитного поля.

Исходя из этого метода и подразумевая уже имеющееся распределение магнитного поля, в электрических машинах используют интегрирование по окружности l_δ радиуса r_δ , проведенной в зазоре:

$$M = \frac{l_a r_\delta}{\mu_0} \int_{l_\delta} B_r \cdot B_\phi \cdot dl, \quad (1)$$

либо, как развитие этого (метод «eggshell» [5,6]), по площади кольцевого сечения зазора S_δ , ограниченной окружностями с радиусами r_R и r_S :

$$M = \frac{l_a}{\mu_0 (r_S - r_R)} \int_{S_\delta} r \cdot B_r \cdot B_\phi \cdot dS. \quad (2)$$

В этих формулах: l_a - активная длина машины; B_r , B_ϕ - радиальная и касательная составляющие магнитной индукции; r - радиус; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Эффективность обусловленного подхода определения электромагнитного момента проверена нами в [7] на примере турбогенератора. При этом рассматривался ненасыщенный вариант его магнитопровода, что позволило использовать для сравнения и подтверждения достоверности известное аналитическое выражения момента, построенное именно на таком допущении.

Данная работа является развитием исследований, начатых в [7], и в широком плане подчинена цели, сформулированной в [8], а именно - адаптация численных расчетов магнитных полей к анализу все большего набора параметров и характеристик электрических машин, что должно послужить делу совершенствования системы их проектирования. А конкретной целью данной работы является анализ реактивного момента, действующего на неявнополюсный ротор турбогенератора ввиду того, что ротор все-таки имеет анизотропию магнитных свойств по продольной и поперечной осям из-за наличия «большого зуба» – зоны по дуге окружности, лишенной пазов. Интерес к численно-полевому решению такой задачи вызван тем, что аналитические выражения для реактивного момента дают в основном только качественную оценку, не позволяя детально выявить числовые значения и реальный характер реактивного момента при различных угловых положениях ротора относительно главной оси магнитного поля, создаваемого обмоткой статора.

Для демонстрационных расчетов принята структура магнитной системы турбогенератора, которая уже представлялась в [7-10] и показана здесь на рис.1. Для адекватного восприятия результатов проводимых исследований приведем следующие его номинальные параметры: активная мощность $P_N = 200$ МВт; фазное напряжение $U_N = 9093$ В; частота $f = 50$ Гц. Из параметров конструкции отметим: число фаз $m = 3$, число пар полюсов $p = 1$, основной немагнитный зазор $\delta = 0,1$ м; активная длина $l_a = 5,286$ м; диаметр ротора $D_R = 1,075$ м; относительное укорочение обмотки $\beta = 4/5$.

Расчет магнитного поля ТГ проводится методом конечных разностей [2] в той постановке, что и в [8,9]. Этот метод позволяет учесть реальную структуру обмоток и магнитопровода, насыщение последнего.

Говоря о реактивном моменте вращения, в синхронных машинах подразумевают момент, действующий на ротор при отсутствии тока в его обмотке и, следовательно, его магнитного поля. То есть в турбогенераторе мы будем

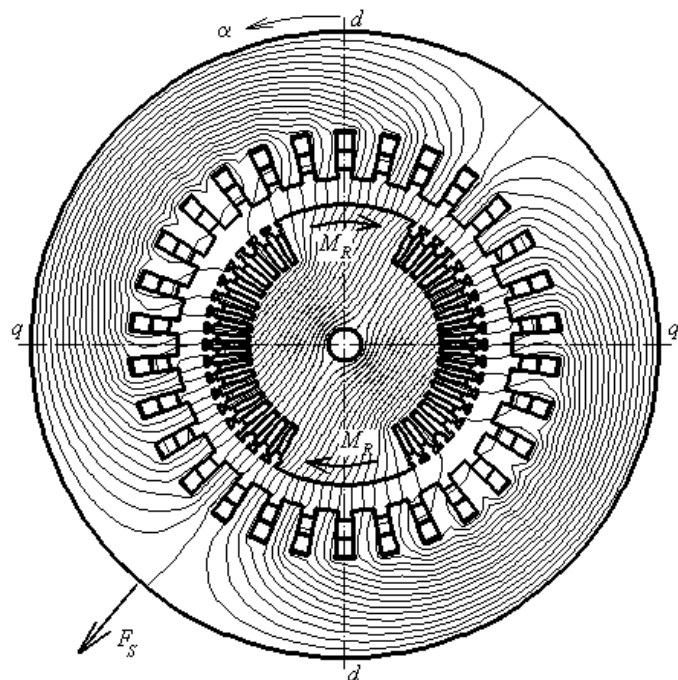


Рисунок 1 – Магнитное поле обмотки статора при угле $\alpha=140^\circ$ ($A_{\max}=0,4129$ Вб/м – наибольшее значение векторного магнитного потенциала)

рассматривать только магнитное поле, создаваемое трехфазной системой токов обмотки статора:

$$i_A = I_m \cos(-\alpha); \quad i_B = I_m \cos(-\alpha - 2/3 \cdot \pi); \quad i_C = I_m \cos(-\alpha + 2/3 \cdot \pi), \quad (3)$$

где I_m - амплитуда фазного тока; α - угол, задающий угловое положение этой структуры токов и, соответственно, положение главной оси действия результирующей магнитодвижущей силы (МДС) F_s обмотки статора.

Основные расчеты были проведены с учетом реального насыщения магнитопровода турбогенератора, а чтобы это насыщение соответствовало тому, которое присутствует в номинальном режиме работы, при $\alpha=0$ был подобран такой ток обмотки статора, при котором ЭДС, возбуждаемая в этой обмотке, соответствовала номинальному напряжению U_N (принцип определения ЭДС изложен в [9]). При поворотах магнитного поля посредством изменения угла α в (3) это значение тока сохранялось.

Итак, задавая различные значения угла α с шагом 5° в диапазоне от 0 до 180° , провели расчеты магнитного поля и на основании формулы (2), приняв в

качестве r_R и r_S радиусы поверхностей ротора и статора, определили реактивный момент M_R . Результаты расчетов представлены частично в таблице, а полностью проиллюстрированы на рис.2 моментной угловой характеристикой (кривая 1). Максимальные значения реактивного момента составило $10,73$ кН·м при $\alpha=40^\circ$, то есть около 1,7 % от номинального момента турбогенератора. Вариантом использования этого момента может быть обеспечение вращения ротора в различных экспериментах или при введении его в синхронизм в случае обесточенной обмотки ротора.

Отметим, что в таблице кроме угла α , входящего в (3), и реактивного момента M_R (2) представлены также относительные значения магнитного потокоцепления Ψ_A фазной обмотки статора (за базу принято значение $\Psi_A=41,06$ Вб при $\alpha=0$), а также угол нагрузки Θ . Величины Ψ_A и Θ определялись на основе методики, изложенной в [8,9]. Конкретно, угол нагрузки в установленной там трактовке – это фазовый сдвиг амплитуды первой гармоники магнитного потокоцепления относительно продольной оси ротора.

Из таблицы следует, что углы α и Θ соответствуют друг другу, но не идентичны. Отметим, что незначительные отличия M_R от нуля при углах α , равных $0, 90^\circ$ и 180° , как и отличие α от Θ , вызваны несимметрией обмотки статора ввиду ее двухслойной структуры в совокупности с укорочением.

Таблица – Данные расчета моментной угловой характеристики

α , градус	Ψ_A , о.е.	Θ , градус	M_R , Н·м
0	1,000	0,9	-43
10	0,997	10,4	4058
20	0,989	19,9	7470
30	0,976	29,6	9794
40	0,960	39,4	10727
50	0,945	49,5	10132
60	0,931	59,8	8204
70	0,921	70,2	5467
80	0,915	80,6	2565
90	0,912	90,9	43
100	0,914	101,2	-2479
110	0,920	111,6	-5379
120	0,931	122,0	-8124
130	0,945	132,3	-10060
140	0,961	142,3	-10661
150	0,976	152,2	-9707
160	0,988	161,8	-7372
170	0,997	171,4	-3960
180	1,000	180,9	43

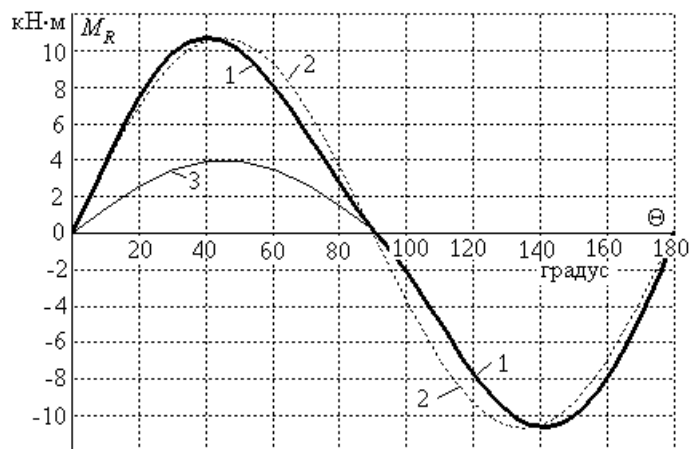


Рисунок 2 – Варианты угловой реактивной моментной характеристики

Картина магнитного поля, соответствующего углу α , при котором достигается отрицательный максимум момента, дана линиями равного векторного магнитного потенциала, то есть силовыми линиями на рис.1. Здесь же показано направление результирующей оси намагничивания вектором МДС F_S , а также соответствующее данному углу α направление реактивного момента M_R , приложенного к ротору.

С целью оценки формы полученной кривой моментной характеристики на том же рис.2 представлена еще чисто синусоидальная (теоретическая по классике) характеристика при амплитуде, равной уже представленному максимуму реактивного момента – кривая 2. Отличие кривых 1 и 2 очевидны и они могут быть объяснены именно характерной конструкцией зубцовой структуры ротора, которая к тому же по разному насыщается в зонах большого зуба и нормальных зубцов.

Для сравнения расчеты численно-полевым методом были проведены при том же токе обмотки статора, но фактически без учета насыщения магнитопровода (его состояние принято соответствующим начальному участку кривой намагничивания сталей и в процессе расчета не изменялось). Результаты представлены на рис.2 кривой 3 в ограниченном диапазоне: от 0 до 90°. Очевидны существенное уменьшение реактивного момента и более синусоидальный характер распределения – ненасыщающиеся нормальные зубцы снижают магнитную анизотропию ротора по продольной d и поперечной q осям.

Чтобы оценить соответствие полученных результатов классической теории, воспользуемся известной аналитической формулой на основе [1]:

$$M_R = \frac{p m U_N^2}{4 \pi f} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\Theta, \quad (4)$$

где x_d , x_q - индуктивные сопротивления фазы обмотки статора по продольной и поперечной осям.

Значения величин x_d и x_q были определены на основе численного расчета магнитного поля по методике [9] и уже представлялись в [10]. Так при ненасыщенной магнитной системе было получено $x_d = 1,871$ Ом, $x_q = 1,837$ Ом, что дало по (4) амплитуду момента 3,9 кН·м – это соответствует амплитуде на кривой 3 (рис.2). Для варианта с учетом насыщения в той постановке, какой и была получена кривая 1, вычислено $x_d = 1,8106$ Ом, $x_q = 1,6651$ Ом - в этом случае по формуле (4) амплитуда момента составила 19,1 кН·м, что примерно в 2 раза больше, чем максимум по кривой 1 (рис.2).

В заключение можно отметить, что вычисление реактивного момента на основе численно-полевых расчетов практически лишено каких-либо серьезных условностей и дает качественно и количественно достоверную информацию. Поэтому такой подход является эффективным средством анализа силовых взаимодействий, как электромагнитных, так и реактивных, в электрических машинах с практически любой конструкцией статора и ротора.

Список литературы: 1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с. 2. Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II: Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p.1546-1564. 3. Chari M.V.K., Silvester P. Element analysis of magnetically Saturated DC machines // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1971. PAS-90, N2, p.2362-2372. 4. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. - М.: Высш. школа, 1989. - 312 с. 5. Arkkio A. Analysis of induction motors based of the numerical solution of the magnetic field and circuit equation // Acta Polytechnica Scandinavica. Helsinki, Finland, 1987. - 97 p. 6. McFee S., Webb J.P., Lowther D.A. A tunable volume integration formulation for force calculation in finite element based computational magnetostatics // IEEE Transactions on Magnetics. - 1998. Vol. 24, № 1. P. 439-442. 7. Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Численно-полевой расчет электромагнитного момента и угловой характеристики идеализированного турбогенератора // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. - Луганськ: СНУ. - 2006. - № 1(95). - С.144-152. 8. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей. // Електротехніка і електромеханіка. - 2003. - №4. - С.59-64. 9. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. - 2006. - №2. - С.40-46. 10. Н.В. Полякова. Анализ индуктивных сопротивлений турбогенератора на основе численных расчетов магнитных полей // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. - 2005. - №1(10). - С.81-86.

Поступила в редколлегию 10.10.06